

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Донского Игоря Геннадьевича «Оценка эффективности энергетических технологий на основе перспективных процессов газификации твердых топлив с помощью кинетико-термодинамических моделей», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

На оппонирование представлены:

- диссертация на 370 с.;
- автореферат на 44 с.

### Актуальность работы

Повышение эффективности производства энергии в современных условиях тесно связано с использованием процессов комплексной переработки топлив и разработкой энергетических систем, основанных на принципах комбинирования различных видов ресурсов. Наиболее перспективной в этом плане является энерготехнологическая переработка твердых топлив, как ископаемых, так и возобновляемых, в том числе и отходов. Создание энерготехнологических установок, предназначенных для переработки широкого спектра таких ресурсов, является сложной научно-технической задачей, и ее решение позволит существенно расширить сырьевую базу энергетики и химической промышленности, а также вовлечь в топливно-энергетический баланс отходы производства и потребления. В первую очередь подобные установки могли бы использоваться для автономных энергетических систем в районах, удаленных от централизованного энергоснабжения.

Представленная на оппонирование диссертационная работа Донского И.Г. выполнена именно в этом направлении и посвящена детальному исследованию энергетических технологий на основе перспективных процессов газификации твердых топлив.

Целью диссертационной работы автора является решение комплексной научно-технической проблемы повышения эффективности переработки твердых топлив путем разработки взаимосвязанных методических подходов и математических моделей для анализа процессов термохимической конверсии твердых топлив для энерготехнологии, а также исследование на этой основе перспективных энергетических установок с газификацией твердых топлив разного состава и происхождения (уголь, биомасса, отходы).

Поставленная цель и полученные в работе результаты не оставляют сомнений в актуальности темы исследования автора диссертационной работы.

## Оценка содержания и структуры работы

Диссертационная работа изложена на 370 с. и состоит из введения, 7 глав, заключения и списка литературы из 784 наименований. Текст диссертации содержит 161 рисунок и 49 таблиц.

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы исследования, цели и задачи диссертационной работы, определяется степень разработанности проблемы, приводятся формулировки новых научных результатов, их теоретической и практической значимости и сведения об апробации, оценивается степень достоверности полученных результатов.

**В первой главе** рассмотрены новые угольные технологии и автономные энергетические системы малой мощности с возобновляемыми источниками энергии. Обосновано, что доля твердого топлива в общем потреблении в перспективе останется весьма значительной, что подтверждает актуальность исследований, направленных на совершенствование технологических и экологических характеристик процессов переработки топлив. Рассмотрены основные особенности физико-химических процессов, протекающих при термохимической конверсии твердых топлив. Среди перспективных направлений выделены ступенчатые способы газификации низкосортного топлива, позволяющие получить генераторный газ с низким содержанием смолы, и высокотемпературная газификация топлива. Проведен сравнительный анализ критериев оценки эффективности данных процессов – химического и эксергетического КПД.

Проведен обзор основных типов математических моделей, которые используются для исследований процессов горения и газификации твердых топлив. Отмечено, что комбинирование математических постановок в рамках одной задачи позволяет строить гибридные модели, в которых отдельные составляющие исследуемого процесса (переменные, области, отдельные стадии) моделируются разными классами математических моделей. Численное исследование возможно при использовании методов расщепления, решения алгебродифференциальных уравнений и т.д. Обоснована необходимость разработки приближенных моделей, учитывающих специфику исследуемых процессов (гетерогенная кинетика химических реакций, явления тепломассопереноса, фазовые переходы), но позволяющих быстро и надежно оценивать характеристики технологических процессов.

**Во второй главе** представлено описание математической модели процессов переноса в реакционной зоне реакторов термохимической конверсии твердого топлива – газогенераторов и пиролизеров, для расчета которых предложено применить расщепление процессов, что позволяет разорвать взаимосвязи и упростить систему уравнений для каждого расчетного элемента в отдельности. Для реакторов газификации в плотном слое и пылеугольном потоке детализируются значения коэффициентов тепломассопереноса, строится вычислительный алгоритм, основанный на методах расщепления по физическим процессам. Проведена

верификация математической модели на обширном экспериментальном материале, включая реакторы для газификации разных масштабов.

**В третьей главе** представлена разработанная соискателем математическая модель слоевого процесса термохимической конверсии твердого топлива для исследования эффективности способов повышения качества генераторного газа при газификации угля, биомассы и горючих отходов. Рассматриваются ступенчатые процессы газификации (со вторичным дутьем и шнековым пиролизером), газификация смесевых топлив, окислительная конверсия смолистых продуктов. Для выбранных условий (мощность установки, составы топлив) выбираются оптимальные (по энергетическим и технологическим критериям) режимы конверсии твердого топлива с получением калорийного газа с низким содержанием смолы.

Математическая модель и результаты расчетов могут быть использованы при оценке эффективности энергетических установок, использующих ступенчатую газификацию, с учетом разных способов нагрева пиролизера, в том числе при исследовании автономных энергетических систем с применением ВИЭ.

Проведено расчетное исследование эффективности каталитической газификации биомассы в плотном слое. Предполагается, что вместе с топливом в слой поступает негорючий каталитически активный материал, способствующий разложению смолистых веществ.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований переработки отходов. Выделяется явление агломерации слоя частиц при сжигании и газификации отходов, содержащих спекающиеся материалы (полимеры, легкоплавкую золу). С помощью математической модели установлены возможные механизмы образования и роста агломерата в разных условиях (способ нагрева, доля плавящихся частиц в слое). В ходе экспериментов по газификации смесей древесных опилок и угля с гранулами полиэтилена были получены агломераты, образование которых может быть связано с предложенными механизмами. Показано, что прочность агломерата определяется особенностями химического и межфазного взаимодействия между компонентами. Рассмотрен процесс газификации биомассы водяным паром при интенсивном внешнем теплоподводе. Исследовано влияние массовых расходов топлива и пара на эффективность процесса газификации.

Проведено численное исследование совместной слоевой газификации смесей древесины и пластика. Пластик (при условии полного разложения) позволяет значительно повысить теплотворную способность продуктов газификации.

Проведено численное исследование изменения проницаемости в слое полимерсодержащих гранулированных материалов. Полученные результаты представляют интерес при исследовании процессов переработки низкосортных топлив, которые часто

сопровождаются спеканием, а также при разработке способов, с помощью которых можно препятствовать спеканию.

Экспериментально исследован процесс спекания при слоевой конверсии смесей бурого угля и полиэтилена. Показано, что уголь сильнее подвержен спеканию в присутствии пластика, чем древесные опилки.

**Пятая глава** посвящена исследованию с помощью разработанной математической модели процессов газификации пылевидного топлива. Анализируются возможности повышения энергетической эффективности процесса газификации древесной пыли, в том числе в смеси с углем на крупных тепловых электростанциях. Дается оценка влиянию состава топливных смесей на границы эффективности совместной газификации. Исследуются перспективные высокотемпературные процессы паровоздушной газификации угля в одно- и двухступенчатых реакторах. Сформулированы рекомендации по отбору оптимальных режимов для дальнейших исследований.

Результаты математического моделирования процесса совместной газификации угля и биомассы в поточном реакторе показывают, что при газификации смесей эффективность конверсии возрастает, в том числе, за счет улучшения стехиометрических условий. Биомасса является топливом с высокой реакционной способностью и высоким содержанием водорода, а уголь – компонентом с высокой теплотворной способностью и высоким содержанием углерода. С помощью одномерной математической модели исследован процесс газификации с двухступенчатой подачей топлива (каменного угля) с нагретым паровоздушным дутьем в широком диапазоне условий. Рассмотрен процесс газификации угольного топлива в высокотемпературном воздушном дутье. Результаты расчетного исследования характеристик режимов воздушной газификации бурых углей в реакторах поточного типа показывают существование ограничений на эффективность процесса, связанные с реакционной способностью и теплотой сгорания топлива. Максимальные значения химического КПД газификации для выбранных сортов достигают 66–68%. Результаты расчетов будут использованы для проведения оптимизационных исследований парогазовых установок с внутрицикловой газификацией бурого угля.

**В шестой главе** рассматриваются процессы газификации угольной пыли с рециркуляцией продуктов сгорания ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ). Проведены расчетные исследования для оценки эффективности высокотемпературной и ступенчатой газификации в смесях кислорода с диоксидом углерода. С помощью термодинамических моделей проведено численное моделирование для оценки характеристик процессов газификации твердых топлив с рециркуляцией продуктов сгорания. Путем варьирования параметров получены оценки для

оптимальных условий конверсии (состав и температура дутья, стехиометрические соотношения). Проведено сравнение процессов газификации в смесях  $O_2/N_2$  и в смесях  $O_2/CO_2$ .

Для процесса кислородной газификации проведено сравнение добавок на примере смесей  $O_2/N_2/CO_2/H_2O$ . Результаты расчетов показывают перспективы управления процессом газификации путем добавления реагентов в разных пропорциях, что позволяет регулировать одни характеристики процесса при сохранении других.

Рассмотрены схемы парогазовых установок с внутрицикловой газификацией угля и улавливанием  $CO_2$ . Двухступенчатый процесс газификации является более перспективным для схем угольных ПГУ с CCS за счет большей эффективности термохимического преобразования топлива в горючий газ.

**Седьмая глава** посвящена оптимизации параметров конкретной тепловой схемы ПГУ с внутрицикловой газификацией бурых углей. Результаты оптимизационных исследований показывают влияние уровня детализации модели на технико-экономические показатели энергетической установки, в том числе, особенности выбора режимов газификации с учетом цены и состава топлива, термохимической эффективности конверсии и механического недожога. Предложена схема угольной ПГУ-ВЦГ с воздушным дутьем и одноступенчатым процессом газификации бурых углей. Для этой схемы построена математическая модель, позволяющая использовать разные приближения для описания блока газификации. Среди таких приближений рассматриваются два варианта модели конечного равновесия и кинетико-термодинамическая модель, разработанная автором. С помощью модели угольной ПГУ-ВЦГ проведены оптимизационные исследования по критериям максимума КПД производства электроэнергии и минимума цены электроэнергии. Расчеты проводились для углей Березовского, Мугунского и Уртуйского месторождений.

**В заключении** представлены результаты проведенных исследований и общие выводы по работе, направления для дальнейших исследований.

Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, докладывались на конференциях различного уровня. По теме диссертации опубликована 41 работа, в т.ч. 29 статей в ведущих изданиях (из них 9 в изданиях списка ВАК, относящихся к специальности 2.4.5, среди которых 7 – из категорий К1 и К2) и 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

### **Обоснованность и достоверность полученных результатов**

Обоснованность полученных результатов обеспечивается валидацией математических моделей с использованием полученных в ИСЭМ СО РАН и опубликованных в научно-

технической литературе экспериментальных данных, а также сравнением с теоретическими результатами других авторов.

### **Новизна результатов исследования**

1. Предложен новый гибридный кинетико-термодинамический подход к моделированию перспективных энерготехнологических процессов. С его помощью исследованы закономерности физико-химических процессов превращений при переработке органических и минеральных компонентов твердых топлив, в том числе в составе энергетических и энерготехнологических установок. Предложенный подход позволяет использовать преимущества кинетических и равновесных моделей, комбинировать их для описания сложных физико-химических систем с химическими реакциями и тепломассопереносом.

2. На основе предложенного подхода разработаны новые численные алгоритмы для решения задач, связанных с горением и газификацией твердого топлива, основанные на методах расщепления и классических методах решения 8 алгебраических и дифференциальных уравнений. Эти алгоритмы позволяют использовать физические особенности задач для сокращения объемов вычислений. Основной особенностью разработанных алгоритмов является комбинирование субмоделей разного типа для описания физико-химических процессов с последующим согласованием решений.

3. С помощью разработанных математических моделей получены теоретические оценки эффективности для перспективных процессов переработки твердых топлив:

а) Высокотемпературная воздушная газификация топливной пыли в ступенчатых реакторах: впервые исследован переход режимов работы реактора от одностадийного к двухстадийному, выявлены новые связи между эффективностью режима и распределением топлива по стадиям; исследованы новые способы снижения выбросов диоксида углерода за счет совместной газификации угля с древесиной, а также способ утилизации диоксида углерода в качестве дутьевого агента.

б) Ступенчатая газификация высоковлажной растительной биомассы с пиролизом сырья: рассмотрены новые варианты сочетания алло- и автотермических режимов в разных ступенях процесса, в т.ч. с пирогазификацией сырья на стадии подготовки; впервые оценена предельная эффективность получения горючего газа с учетом ограничений на температуру конверсии смолистых продуктов, оценены диапазоны условий с высоким выходом углеродистого остатка.

в) Совместная газификация отходов (бытовые отходы с высоким содержанием пластика, шламы сточных вод) вместе с качественным твердым топливом: исследованы процессы совместной конверсии угля, биомассы и муниципальных отходов; предложена новая методика оценки граничных значений эффективности и обоснованной массовой доли

низкосортного топлива, обусловленной его особенностями (влажностью, спекаемостью, плавкостью золы), в смеси с более качественным.

4. В работе предложены новые модели парогазовых энергетических установок с низкотемпературной газификацией угля, с помощью которых проведены оптимизационные исследования по технико-экономическим критериям для разных условий.

**Теоретическая ценность работы** заключается в разработке новых математических моделей и эффективных вычислительных алгоритмов для решения задач, связанных с горением и газификацией твердого топлива, которые могут быть использованы для теоретического исследования других процессов химической технологии.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что полученные теоретические оценки и результаты экспериментальных исследований позволят сократить временные и материальные затраты при разработке энерготехнологических установок. Полученные расчетные оценки характеристик термохимических процессов конверсии топлив и их зависимости от условий реагирования могут быть применены при разработке устройств для сжигания и газификации. Проведенные технико-экономические исследования перспективных парогазовых установок с внутрицикловой газификацией твердых топлив могут быть интересны для разработчиков энергетического оборудования.

#### **Соответствие диссертации паспорту специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы в следующих пунктах:

п. 1: разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования;

п. 2: математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии;

п. 6: теоретический анализ, экспериментальные исследования, физическое и математическое моделирование, проектирование энергоустановок, электростанций и энергетических комплексов, функционирующих на основе преобразования возобновляемых видов энергии (энергии водных потоков, солнечной энергии, энергии ветра, энергии биомассы,

энергии тепла земли и других видов возобновляемой энергии) с целью исследования и оптимизации их параметров, режимов работы, экономии ископаемых видов топлива и решения проблем экологического и социально-экономического характера;

п. 7: исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем и комплексов, на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику и экономику природопользования.

### **Замечания по работе**

1. На с.51 диссертации указано, что «структура угольных молекул обычно неизвестна», однако существуют модели структуры угольной молекулы, например, модель Ван-Кревелена, с помощью которой можно достаточно наглядно представить процесс разложения органической массы угля.

2. На с.115 диссертации представлены режимы газификации угольной пыли для верификации математической пыли с монодисперсным составом угольной пыли, хотя в действительности состав ее полидисперсный.

3. С. 127 диссертации, уравнение 3.9 – не указано, как определялся коэффициент диффузии  $D_0$ .

4. На с.147, на рис. 3.17 диссертации показан поток горячих газов, поступающих в реактор пиролиза, но не указано, откуда они поступают. Если используется дополнительное топливо или полученный целевой генераторный газ, то это повлияет на эффективность процесса. Как учитывается это влияние?

5. На с.207, табл.5.1 диссертации указано, что древесина измельчается до размеров частиц 120-180 мкм, однако затраты энергии при этом будут весьма значительными. Как они оцениваются и какое оборудование будет использовано для измельчения?

6. На с.248, рис. 5.41 диссертации указан параметр «нагрузка реактора». Как он определяется, по сырью или по получаемому газу?

7. В главе 7 диссертации представлена схема ПГУ с газификацией твердого топлива, однако не упоминается о затратах на модернизацию газотурбинной установки и ее топливной системы при сжигании генераторного газа.

### **Заключение по работе**

Вышеуказанные замечания не снижают научной ценности представленной работы. Диссертация Донского И.Г. является завершённой научно-квалификационной работой в области разработки энергетических систем и комплексов, основанных на высокоэффективной энерготехнологической переработке твердых топлив и использовании возобновляемых



энергетических ресурсов. Тема работы актуальна, полученные результаты обладают новизной, теоретической и практической значимостью. Содержание диссертации соответствует специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Диссертационная работа «Оценка эффективности энергетических технологий на основе перспективных процессов газификации твердых топлив с помощью кинетико-термодинамических моделей» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, критериям пунктов 9-14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (с изм. и доп.), а ее автор Донской Игорь Геннадьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент

заведующий кафедрой

«Энергетическое машиностроение»

ФГБОУ ВО КГЭУ

*г-*

Мингалеева Гузель Рашидовна

*27.02.2024г.*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО КГЭУ)

Адрес организации:

420066, г. Казань, улица Красносельская д.51

Телефон организации

(843) 519-42-20

E-mail организации

[kgeu@kgeu.ru](mailto:kgeu@kgeu.ru)

Веб-сайт организации

<http://www.kgeu.ru>

Телефон (контактный)

(843) 519-43-16

E-mail(контактный)

[mingaleeva-gr@mail.ru](mailto:mingaleeva-gr@mail.ru)

ФГБОУ ВО КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

*Мингалеева Г.Р.*

*Мингалеева Г.А.*

